

*Р. П. Ижевский<sup>1</sup>, С. В. Шаповалов<sup>1</sup>, В. Г. Лисиенко<sup>1</sup>, С. И. Холод<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

<sup>2</sup>Технический университет УГМК, г. В. Пышма

[hsi503@yandex.ru](mailto:hsi503@yandex.ru)

## ВОЗМОЖНОСТЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*В данной работе получены оптимальные значения параметров для проектируемой вентиляционной сети шахты ГОКа Уральского региона. С целью эффективного использования вентиляторной установки в системе проветривания шахты решена оптимизационная задача с использованием данных полной аэродинамической характеристики. Представлены рекомендации для проектирования вентиляторной установки.*

*Ключевые слова: полная аэродинамическая характеристика, моделирование, оптимизационная задача, симплекс-метод*

*R. P. Izhevsky<sup>1</sup>, S. V. Shapovalov<sup>1</sup>, V. G. Lisienko<sup>1</sup>, S. I. Holod<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Ural Federal University, Ekaterinburg

<sup>2</sup>UMMC Technical University, V. Pyshma

## OPPORTUNITY TO OPTIMIZE THE PARAMETERS OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS BY THE METHOD OF MATHEMATICAL MODELING

*In this work, the optimal values of the parameters for the designed ventilation network of the mine of the GOK of the Ural region are obtained. In order to efficiently use the fan unit in the mine ventilation system, the optimization problem has been solved using the data of the full aerodynamic characteristic. Recommendations for designing a fan unit are presented.*

*Keywords: full aerodynamic characteristic, modeling, optimization problem, simplex method*

Приоритетной задачей современных экономических условий является поиск эффективного и рационального использования энергоресурсов. Особенно актуальна данная задача в условиях проектирования и обеспечения заданного режима работы шахтных вентиляторных установок. Эффективное функционирование вентиляционной системы осуществляется при условии соответствия значения давления значению определенной удельной производительности. Рабочей точкой (РТ) при этом является точка, лежащая на пересечении линии характеристики вентилятора и линии характеристики сети (рис. 1). График характеризует зависимость давления воздуха в сети  $P$ , Па от расхода воздуха  $Q$ , м<sup>3</sup>/с и меняется с изменением аэродинамического сопротивления  $\Delta P$ , Па. При этом для обеспечения заданной производительности  $Q_{\text{раб}}$  необходимо изменять скорость вращения вентилятора.

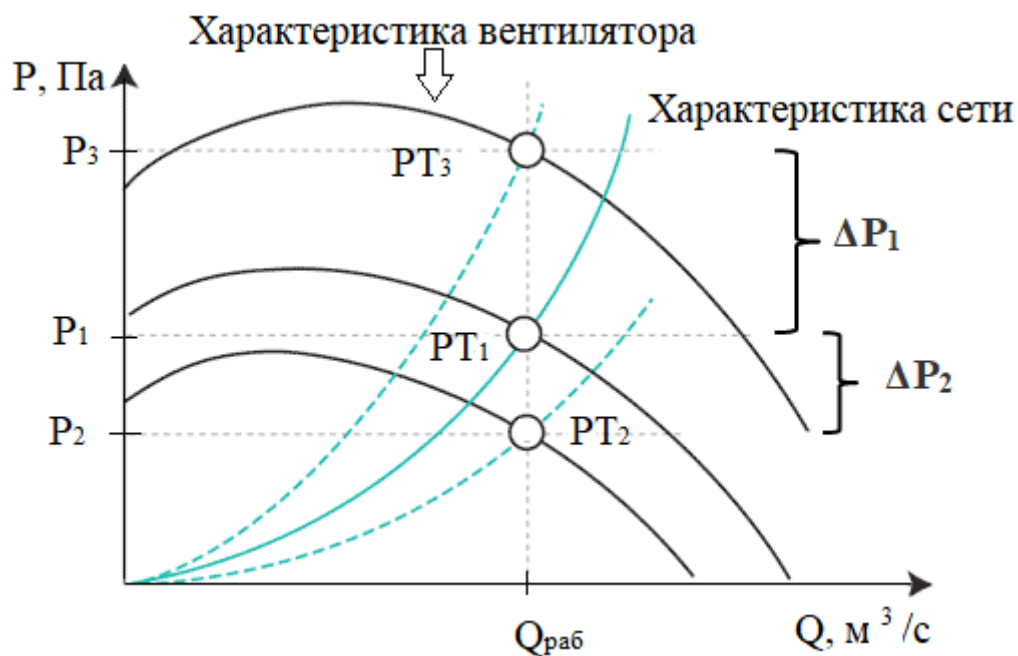


Рис. 1. Зависимость расхода воздуха от сопротивления сети при различной скорости вращения рабочего колеса вентилятора

Для определения возможных условий функционирования конкретной системы строится полная аэродинамическая характеристика по данным испытаний, проведенных в соответствии с ГОСТ 10921-2017 [1].

В общем виде аэродинамическая характеристика вентилятора представляет собой графическую интерпретацию зависимости между

производительностью и полным давлением  $P$ , мощностью на валу  $N$ , КПД  $\eta$  с определенным диаметром рабочего колеса и известной плотностью перемещаемой среды.

Анализ аэродинамической характеристики показывает, что режим работы вентиляторной установки (ВУ) с одной стороны зависит от технических характеристик устройств, входящих в нее, а с другой тесно связан с параметрами вентиляционной системы. При этом выбор и поддержание технических параметров устройств, входящих в ВУ является достаточно контролируемым процессом, а управление характеристикой вентиляционной сети и ее контроль – значительно сложнее. Это связано в первую очередь с непредсказуемыми изменениями аэродинамических сопротивлений элементов системы, которые приводят к перераспределению расходов воздуха и изменению режима работы ВУ по производительности. Поэтому ВУ должна быть подобрана с некоторым запасом давления, и, как следствие, с выходом на производительность, превышающую расчетную. Данное обстоятельство приводит к снижению эффективности функционирования системы. С другой стороны, каждому значению максимума параметров ( $P$ ,  $N$ ,  $\eta$ ) соответствует свое значение производительности (рис. 2).

В этой ситуации возникает необходимость поиска оптимальной производительности, удовлетворяющей наиболее благоприятным условиям.

В данной работе получены оптимальные значения параметров для проектируемой вентиляционной сети шахты ГОКа Уральского региона. Диапазон изменения параметров для расчетного давления проектируемой вентиляционной сети (угол поворота лопаток рабочего колеса  $\alpha = 35^\circ$ ), по полученным на предприятии данным, представлен в табл. 1 и на рис. 2.

Анализ данных, представленных в табл. 1 и на рис. 2, показывает, что максимальному значению давления 4860 Па соответствует производительность 500 м<sup>3</sup>/с, а максимальной мощности двигателя 3240 кВт – 575 м<sup>3</sup>/с. При этом достижение экстремума сопровождается уменьшением КПД.

Таблица 1

Показатели аэродинамической характеристики в расчетном диапазоне проектируемой вентиляционной сети

Производительность, м <sup>3</sup> /с	Давление, Па	Мощность, кВт
450	4660	3050
475	4830	3150
<b>500</b>	<b>4860</b>	3180
525	4845	3215
550	4825	3220
<b>575</b>	4660	<b>3240</b>
600	4500	3210
625	4325	3200
650	4115	3115
675	3865	3030
700	3515	2970
725	3240	2865
750	2864	2785
775	2470	2650
800	2000	2490

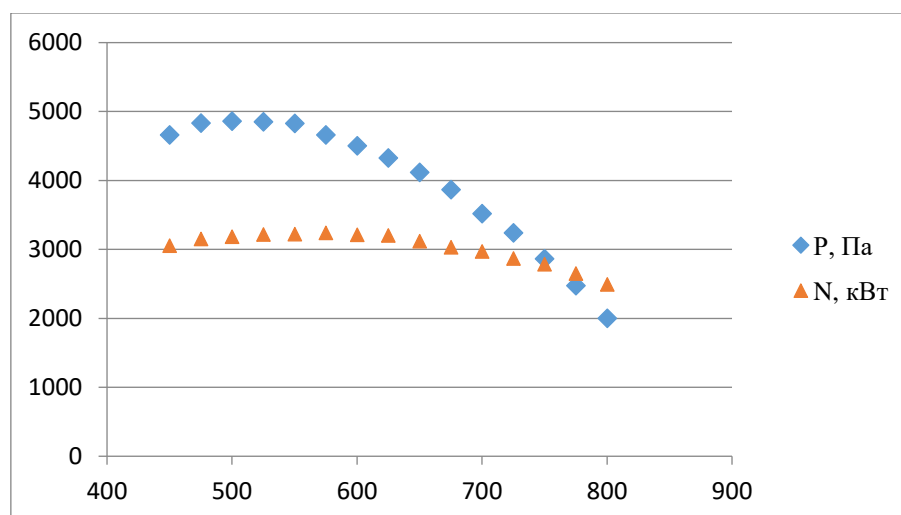


Рис. 2. Зависимость основных показателей аэродинамической характеристики ( $Q$ ,  $P$ ,  $N$ ) при  $\alpha = 35^\circ$

Для решения оптимизационной задачи [2] использовались данные табл. 1. Областью определения задачи является некоторый диапазон изменения основных параметров, в пределах которого производительность должна быть оптимальной (от 600 до 800 м<sup>3</sup>/с). В качестве ограничений выбраны граничные показатели для выбранных условий и требований к сети.

Критерий оптимальности был определен в виде целевой функции:

$$Y = 11 x_1 + 13 x_2 + 14 x_3 \rightarrow \min, \quad (1)$$

ограничения – в форме системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\begin{cases} 4500x_1 + 3515x_2 + 2000x_3 \leq 4100 \\ 3215x_1 + 2865x_2 + 2490x_3 \leq 3100 \\ 35x_1 + 35x_2 + 35x_3 \leq 35 \\ 0,83x_1 + 0,82x_2 + 0,65x_3 \geq 0,83 \end{cases} \quad (2)$$

где  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  – произвольные начальные приближения, соответствующие значениям производительности 600, 700, 800 м<sup>3</sup>/с.

Целевая функция, представляет собой стоимость электроэнергии, которая должна быть минимальной при оптимальной производительности. Финансовые показатели (затраты, тыс. руб.) выбраны формально.

Алгоритм целевой функции составили в виде табл. 2, которая является исходным опорным планом.

Таблица 2

Технологические параметры для различной производительности

Параметры	Производительность			Ограничения
	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	
Давление Р, Па	4500	3515	2000	$\leq 4100$
Потребляемая мощность N, кВт	3215	2865	2490	$\leq 3100$
Угол поворота лопаток рабочего колеса $\alpha$ , град	35	35	35	$\leq 35$
КПД $\eta$ , доли ед.	0,83	0,82	0,65	$\geq 0,83$
Затраты, тыс. руб.	11	13	14	

Систему линейных алгебраических уравнений решали симплекс-методом в среде прикладного пакета *Microsoft Excel* с помощью программы Поиск решения.

Результирующая матрица расчетов представлена в табл. 3.

Таблица 3

Результирующая матрица с оптимальным значением целевой функции

Начальные приближения	0,57543	0,42975	0				
Давление, Па	4500	3514	2000	4100			4100
Мощность, кВт	3215	2865	2490	3081,24		ЦФ	3100
Угол $\alpha$ , град	35	35	35	35,18		11,96	35
КПД, доли ед.	0,83	0,82	0,65	0,83			0,83
Цена, тыс. руб.	11	13	14				
Оптимальная производительность, м <sup>3</sup> /с						646	

Был также проведен анализ устойчивости модели путем изменения ее параметров. Анализ чувствительности показал, что оптимальное решение и значение целевой функции при незначительном изменении параметров не изменялось в широких пределах, поэтому такое решение может быть рекомендовано для использования при проектировании системы.

По данным расчетов для проектирования системы выбрали следующие значения: давление – 4100 Па; угол поворота лопаток рабочего колеса  $\alpha = 35^\circ$ ; мощность 3080 кВт; КПД – 0,84, что соответствует необходимой производительности 650 м<sup>3</sup>/с и требованиям энергоэффективности.

Данная методика позволяет подбирать эффективные показатели для функционирования системы с точки зрения экономии энергоресурсов. Уменьшение текущего энергопотребления позволит высвободить мощности для дальнейшего развития и модернизации.

Снижение нагрузок на технологическое оборудование и энергетическую инфраструктуру позволяет уменьшить расходы, связанные с их эксплуатацией и ремонтами.

#### Список использованных источников

1. ГОСТ 10921-2017. Вентиляторы радиальные и осевые. Методы аэродинамических испытаний. Введ. 01.07.2019. М. : Стандартинформ, 2018. 45 с.
2. Агеев Н. Г. Моделирование процессов и объектов в металлургии. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. 108 с.